

文章编号: 1006-7736(2002)02-0001-05

# 船舶碰撞危险度的新模型<sup>\*</sup>

郑中义, 吴兆麟

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为了建立船舶自动避碰决策系统, 分析了船舶碰撞危险度的本质, 提出了空间碰撞危险度和时间碰撞危险度的概念, 并对其进行了解释. 基于刺激-行动的理论、船舶领域的概念及最晚施舵点, 建立了空间碰撞危险度、时间碰撞危险度和碰撞危险度模型. 这一研究成果发展和完善了船舶碰撞危险度的概念和模型, 更符合逻辑, 具有应用价值.

**关键词:** 船舶; 空间碰撞; 时间; 危险度; 数字模型

**中图分类号:** U 675.96 **文献标识码:** A

## 0 引言

在船舶避碰及自动避碰决策系统研究中, 碰撞危险度是十分重要的, 因此许多专家学者进行了很多研究. 根据对以前研究成果的概括总结, 船舶碰撞危险的量化研究基本上经历了四个阶段: 第一阶段是基于交通流理论, 以船舶会遇率(或会遇次数等)、特定水域历史碰撞事故等, 评价特定水域的碰撞危险度. 第二阶段是从微观的角度, 根据人体行为学及心理学等, 以船舶领域或动界评价碰撞危险度. 第三阶段在确定船舶碰撞危险度时, 应该综合考虑  $d_{DCPA}$  和  $t_{TCPA}$  两方面的影响. 第四阶段是实现  $t_{TCPA}$  与  $d_{DCPA}$  确定碰撞危险度.

为此, 本文认为以  $d_{DCPA}$  和  $t_{TCPA}$  为主所确定的碰撞危险度, 实际上体现的是时间的和空间的碰撞危险度的合成. 所以, 在综合前人研究的基础上, 本文提出了时间碰撞危险度(Time Collision Risk—TCR)和空间碰撞危险度(Space Collision Risk—SCR)的概念, 并在本文中建立时间碰撞危险度和空间碰撞危险度的模型, 最后建立碰撞危

险度模型.

## 1 SCR 的概念和模型

### 1.1 SCR 的定义

SCR 定义为: 存在碰撞危险会遇两船中的一船, 以他船初始最近会遇距离( $d_{DCPA_0}$ )、初始最近会遇点的方位、他船相对于本船的相对方位及两船最低安全会遇距离为主要指标所确定的两船发生碰撞可能性大小的度量. 这一概念的含义是:

第一, 空间碰撞危险度主要以他船初始最近会遇距离( $d_{DCPA_0}$ )、初始最近会遇点的方位及他船相对于本船的相对方位为主要因素. 这是由于: (1) 根据国际海上避碰规则规定, 除极少数会遇局面外, 存在直航船和让路船之分, 而判断直航船和让路船责任的依据主要是来船的相对方位, 且由于发生碰撞后责任不同, 从驾驶员心理上感觉到的碰撞危险也不相同. 通常让路船感觉到的碰撞危险相对较大. (2) 一船领域的大小是其舷角的函数.

第二, 在特定会遇局面中, 一船与另一船的空

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2002-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60172044).

作者简介: 郑中义(1964), 男, 河北安国人, 副教授, 主要从事海上安全定量的研究.

间碰撞危险度不一定相同。

第三, 空间碰撞危险度反映的是船舶碰撞可能性的度量。这是和时间碰撞危险度所反映的碰撞紧迫性相对应的。这种说法符合船员通常所说的: 在两船都不采取避碰行动前提下, 他船最近会遇距离小, 碰撞危险度就大, 反之则小的说法。

第四, 在特定的会遇局面中, 以他船的初始最近会遇距离、初始最近会遇点的相对方位为主要指标, 并不是不考虑其他方面的因素。根据参考文献 [1], 在特定水域、特定会遇局面及特定的两船会遇中, 船舶之间的作用力与两船相对速度的大小、船舶大小有关。因此, 在建立空间碰撞危险度模型时, 还应考虑其他方面的因素。

### 1.2 影响 SCR 的因素

根据收集到的研究成果及对空间碰撞危险度拟合后的重复调查, 影响船舶空间碰撞危险度 SCR 的主要因素包括:  $d_{DCPA_0}$ 、最近会遇点的相对方位 (relative bearings of  $d_{DCPA_0}$ )、最低安全通过距离、驾驶员心理感觉危险度为零的边界、来船相对方位、领域边界的模糊性及  $d_{DCPA_0}$  观测误差。

$d_{DCPA_0}$  是影响空间碰撞危险度的主要因素, 这在过去许多研究中都有体现。在碰撞危险度的研究中, 最初仅以  $d_{DCPA_0}$  为标志, 以后又用  $d_{DCPA_0}$  与  $t_{TCPA}$  综合考虑, 都反映了  $d_{DCPA}$  对船舶碰撞危险度影响的重要性。而  $d_{DCPA_0}$  反映的是会遇并存在碰撞危险两船空间上的间隔距离, 当会遇两船的  $d_{DCPA_0}$  大于某一值时, 不论根据客观实际还是驾驶员的心理感觉, 两船都不存在碰撞危险; 若  $d_{DCPA_0}$  小于某一值时, 虽然在客观上不存在碰撞危险, 但驾驶员心理上并不一定感觉到安全。而介于驾驶员感觉安全与不安全之间的  $d_{DCPA_0}$  的临界值或根据客观实际当  $d_{DCPA_0}$  小于某一值时两船则肯定会发生碰撞。该临界值就可定义为两船最低安全会遇距离。

在实践中, 由于最低安全会遇距离是模糊的, 并不十分确定。驾驶员在避碰时, 有时即使本船与他船以最低安全会遇距离或在略小于该距离上通过, 也不一定采取避碰行动; 而有时, 即使本船与他船之间以略大于最低安全会遇距离通过, 也可能采取避碰行动。由于在测定  $d_{DCPA_0}$  值时, 所使用的设备存在误差, 在避碰决策或自动避碰决策系统中应予以考虑。

在本文中, 取驾驶员心理感觉到的临界值作为最低安全通过距离。主要是由于船舶是由驾驶员控制并进行避碰操纵的。

来船相对方位大小不同, 要达到一定的安全会遇距离, 要求船舶避让转向幅度并不相同。若对不同方位的来船在相同的距离上采取避碰行动, 则来船的舷角越大需要转向的幅度也越大; 反之则越小。总之对不同方位的来船, 本船转向避让的困难程度并不完全相同。另外, 根据日本学者藤井及英国学者 Goodwin 的船舶领域概念可知, 对不同方位的来船, 本船所要求的最低安全通过距离并不相同。因此, 为了在空间碰撞危险度模型中反映上述两方面的影响, 来船的相对方位也是影响船舶空间碰撞危险度的重要因素之一。

### 1.3 定义

#### (1) 船舶安全会遇领域 $d_1$

这是指本船周围所保持的与他船间的最低安全会遇距离<sup>[2]</sup>。在该区域内, 本船拒绝他船侵入。在确定本船空间碰撞危险度时, 可认为若他船侵入该领域, 则空间碰撞危险度为 1。

#### (2) $d_1$ 与船舶领域概念的区别和联系

$d_1$  是与船舶领域有密切联系的概念, 它以船舶领域为基础, 考虑了领域边界模糊和船舶观测设备的观测误差。

一般认为 Goodwin 的观测最适宜于海上。其观测结果为: 对于本船右舷  $0^\circ \sim 112.5^\circ$  的来船,  $d_1$  为 0.85 n mile; 对于  $112.5^\circ \sim 247.5^\circ$  的来船,  $d_1$  为 0.45 n mile; 对于  $247.5^\circ \sim 360^\circ$  的来船,  $d_1$  为 0.70 n mile。在确定  $d_1$  时, 考虑到观测  $d_{DCPA_0}$  时存在的误差和  $d_{DCPA}$  模糊边界问题, 参考文献 [3] 认为: 当  $d_{DCPA_0}$  与  $d_{DCPA_S}$  (船舶领域) 相差很小时, 驾驶员也可能不采取行动。为此, 调查结果得出:  $FBD = 0.276d_{DCPA_S}$ 。为保证安全, 则

$$d_1 \approx \text{domin} + |0.276d_{DCPA_S} + \text{mean error}| \quad (1)$$

根据上式, 在 Goodwin 观测的基础上修正的  $d_1$  见表 1。

表 1 围绕本船周围的  $d_1$  值

与本船相对舷角 / ( $^\circ$ )	000	090	180	270
$d_1$ / n mile	1.1	1.0	0.6	0.9

根据表 1, 拟合的  $d_1$  与来船相对舷角关系见图 1。

### 1.4 空间危险度零边界的确定

根据调查与观测, 在海上对于通过左舷的来

船, 当  $d_{DCPA_0}$  为 1.5 n mile 时, 有 98% 的船舶不采取任何避碰行动. 对于通过右舷或通过本船船首的来船, 当  $d_{DCPA_0}$  为 1.5 n mile 时, 有 94.3% 的船舶不采取任何避碰行动; 当  $d_{DCPA_0}$  为 1.6 n mile 时, 所有的船舶都不采取任何避碰行动. 对于通过本船船尾的船舶, 当初始  $d_{DCPA}$  为 0.8 n mile 时, 有 98.3% 的船舶不采取任何避碰行动; 当  $d_{DCPA_0}$  为 0.9 n mile 时, 100% 的船舶不采取避碰行动. 因此可得出:  $d_2$  在左舷约为 1.5 n mile, 在右舷和船首约为 1.6 n mile, 在船尾约为 0.9 n mile. 考虑到观测使用设备如 ARPA 的误差和边界的模糊性, 可令  $d_2 \approx 2d_1$ , 见表 2 所示.

表 2 围绕本船周围的  $d_2$  值

与本船相对舷角 / (°)	000	090	180	270
$d_2$ / n mile	2.2	2.0	1.2	1.8

1.5 空间碰撞危险度在  $d_1 \sim d_2$  之间的分布

在 1956 年, S. S. Stevens<sup>[4]</sup> 证明了心理感应强度公式为

$$\phi = k(\varphi - \varphi_0)^n$$

式中,  $\phi$  为心理感应强度;  $\varphi$  为刺激量大小;  $k$  为常数, 取决于心理感应强度的大小;  $n$  为一变量, 其大小随不同感官(如视觉、听觉)而异. 根据其测定,  $n$  值在 0.33 ~ 3.5 之间. 其中视觉对光亮度取  $n = 0.33$ , 对电击  $n = 3.5$ .

由于对来船  $d_{DCPA_0}$  的确定等, 即空间碰撞危险度主要是依靠视觉从海上或从雷达上确定的, 且 S. S. Stevens 在确定对光变化的心理感应强度时, 是随光强度的增加而变化的, 因此为适宜于本船确定的空间碰撞危险度, 在本文中取  $n = 1/0.33 = 3.03$ .

1.6 空间碰撞危险度的确定

在确定了  $d_1$  与  $d_2$  后, 设: 本船与他船的初始会遇距离  $d_{DCPA_0}$  的变化域为  $U_d$ , 空间碰撞危险度集为  $U_{dT}$ , 则建立的  $U_{dT}$  的隶属度函数为

$$u_{dT} = \begin{cases} 1 & |d_{DCPA_0}| < d_1 \\ \left[ \frac{d_2 - |d_{DCPA_0}|}{d_2 - d_1} \right]^{3.03} & d_1 \leq |d_{DCPA_0}| \leq d_2 \\ 0 & d_2 < |d_{DCPA_0}| \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $d_{DCPA_0} = R_T \cdot \sin(\varphi_R - \alpha_T - \pi)$

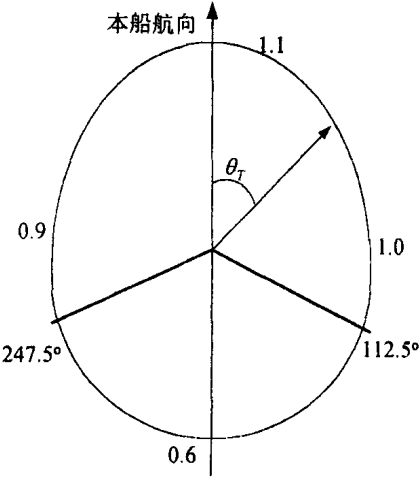


图 1  $d_1$  依  $\theta_T$  分布图

$$d_1 = \begin{cases} 1.1 - \frac{\theta_T}{180} \times 0.2 & 0^\circ \leq \theta_T \leq 112.5^\circ \\ 1.0 - \frac{\theta_T}{180} \times 0.4 & 112.5^\circ < \theta_T \leq 180^\circ \\ 1.0 - \frac{360 - \theta_T}{180} \times 0.4 & 180^\circ < \theta_T \leq 247.5^\circ \\ 1.1 - \frac{360 - \theta_T}{180} \times 0.4 & 247.5^\circ < \theta_T \leq 360^\circ \\ 1.5\rho(\theta_T) \end{cases}$$

2 TCR 的概念及考虑的因素

2.1 TCR 的概念

对 TCR 的定义为: 存在碰撞危险会遇两船中的一般驶近到其最晚施舵点的时间上的紧迫程度. 这一概念的含义是: 第一, 会遇两船各自的时间碰撞危险度不一定相同. 这主要是由于各自的最晚施舵点不相同. 第二, TCR 应以多因素加以确定. 第三, 它是碰撞紧迫程度的度量.

2.2 确定 TCR 应考虑的因素

时间碰撞危险度是碰撞紧迫程度的度量. 在建立 TCR 模型时应考虑他船的  $t_{TCPA}$ , 他船从本船最晚施舵点至最近会遇点的时间, 他船位于本船 ARPA 常用的长扫描距离(12 n mile)到最近会遇点的时间及本船驾驶员的感觉. 而在确定本船最晚施舵点时, 考虑了会遇两船速度、速度比、本船长度、本船转向  $90^\circ$  的前进距离、本船转向  $90^\circ$  的横移距离、本船转向  $90^\circ$  的速度降低、本船转向  $90^\circ$  时间内他船的前进距离、 $d_{DCPA_0}$  及在两船会遇态势下驾驶员通常的转向避让方向等因素.

2.3 时间碰撞危险度模型

如图 2 所示, 位于坐标原点的为本船, 设  $D_1$  为本船最晚施舵点; 根据船舶会遇运动要素图有

$$t_{TCPA} = R_T \cos(\varphi_R - \alpha_T - \pi) / v_R$$

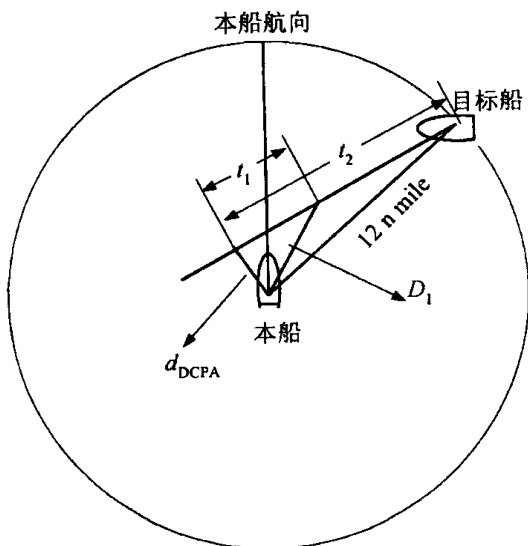


图 2  $t_1$  和  $t_2$  与时间碰撞危险度关系图

式中,  $R_T$  为本船与他船的距离;  $\varphi_R$  为他船相对本船的运动航向;  $\alpha_T$  为他船相对本船的真方位;  $v_R$  为他船相对运动速度. 其中,  $t_{TCPA}$  为“+”表示他船还未驶到最近会遇点;  $t_{TCPA}$  为“-”则表示他船已驶过最近会遇点.

设最低安全会遇距离为  $d_1$ . 根据对最晚施舵点的定义, 若他船接近到与本船的距离小于  $D_1$  时, 则本船转向  $90^\circ$  肯定不能保证两船在最低安全会遇距离通过. 因此, 可设他船从  $A$  点到  $CPA$  点的时间为  $t_1$ , 则

$$t_1 = \frac{\sqrt{D_1^2 - d_{DCPA_0}^2}}{v_R}$$

即, 若他船到最近会遇点的时间小于  $t_1$ , 则单凭本船采取大幅度转向行动 ( $90^\circ$ ), 两船肯定不能在最低安全会遇距离上通过, 因此可定义他船到最近会遇距离点的时间小于  $t_1$  时, 时间碰撞危险度为 1, 即

$$\text{若 } t_{TCPA} \leq t_1, \text{ 则 } TCR = 1$$

在日常生活中, 人们感觉到的危险是以发现危险目标为前提的, 若在海上驾驶员未发现任何船舶, 通常不认为存在碰撞危险. 因此, 考虑到海上以视觉或雷达观测的实际情况, 定义当来船与本船距离大于 12 n mile 时, 来船驶到最近会遇点的时间为  $t_2$ , 且时间碰撞危险度为零, 即

$$t_2 = \frac{\sqrt{12^2 - d_{DCPA_0}^2}}{v_R}$$

$$\text{若 } t_{TCPA} > t_2, \text{ 则 } TCR = 0$$

当确定了时间碰撞危险度两个边界值后, 关键问题是确定时间碰撞危险度在两边界之间的变化.

同样根据 S.S.Stevens<sup>[4]</sup> 的研究成果, 在  $t_1 \sim t_2$  之间,  $TCR$  为

$$TCR = k \left[ \frac{t_2 - t_{TCPA}}{t_2 - t_1} \right]^{3.03}$$

记本船与他船的初始会遇时间  $t_{TCPA}$  的变化域为  $U_t$ , 并记时间碰撞危险度集为  $U_{iT}$ , 则建立的  $U_{iT}$  的隶属度函数  $u_{iT}$  为:

(1) 当  $t_{TCPA} > 0$  时

$$u_{iT} = \begin{cases} 1 & t_{TCPA} \leq t_1 \\ \left[ \frac{t_2 - t_{TCPA}}{t_2 - t_1} \right]^{3.03} & t_1 < t_{TCPA} \leq t_2 \\ 0 & t_{TCPA} > t_2 \end{cases}$$

(2) 若  $t_{TCPA} \leq 0$

$$u_{iT} = \begin{cases} 1 & t_{TCPA} \leq t_1 \\ \left[ \frac{t_2 + t_{TCPA}}{t_2 - t_1} \right]^{3.03} & t_1 < t_{TCPA} \leq t_2 \\ 0 & t_{TCPA} > t_2 \end{cases}$$

式中

$$t_1 = \frac{\sqrt{D_1^2 - d_{DCPA_0}^2}}{v_R}$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{12^2 - d_{DCPA_0}^2}}{v_R}$$

### 3 碰撞危险度模型

碰撞危险度是时间碰撞危险度和空间碰撞危险度的组合, 碰撞危险度集合定义为

$$u_T = u_{dT} \circ u_{iT}$$

根据避碰实际, 上述算子的定义是<sup>[3]</sup>:

- (1) 若  $u_{dT} = 0$ , 则  $u_T = 0$ ;
- (2) 若  $u_{dT} \neq 0$ ,  $u_{iT} = 0$ , 则  $u_T = 0$ ;
- (3) 若  $u_{dT} \neq 0$ ,  $u_{iT} \neq 0$   
则  $u_T = \max[u_{dT}, u_{iT}]$ .

### 4 结论

为了建立船舶自动避碰决策系统, 基于对前人研究成果的分析和海上避碰实践, 提出了空间碰撞危险度和时间碰撞危险度的概念, 分别建立了其模型. 本研究的特点是:

- (1) 使船舶碰撞危险度的内涵更加明确, 并将其分为空间碰撞危险度和时间碰撞危险度;
- (2) 基于前人的研究成果, 并与海上避碰实践相结合;
- (3) 碰撞危险度模型是多因素的;
- (4) 在建立空间碰撞危险度和时间碰撞危险度模型时, 引用了刺激 - 行为(反应) 理论;
- (5) 该模型特别适用于自动避碰决策系统与自动避碰决策系统之间的避碰及自动避碰决策系

- 统与人之间的避碰.
- 其局限性有:
- (1) 所建立的碰撞危险度模型没有考虑意外情况, 如在会遇过程中, 一船的舵设备突然失灵等;
  - (2) 模型只适用于不受限水域;
  - (3) 空间碰撞危险度与时间碰撞危险度合成算子的适用性也是值得进一步研究的.

参 考 文 献:

[ 1 ] EDWARD T G. Maritime Accidents-What Went Wrong[ R] , 1989. 51.

[ 2 ] GOODWIN E M. A Statistical Study of Ship Domain[ J] . Journal of Navigation, 1975. 28( 3): 328-344.

[ 3 ] 赵劲松. 船舶驾驶员主观碰撞危险测度[ J] . 大连海运学院学报, 1990. 16( 1): 29-31.

[ 4 ] STEVENS S, S. The Surprising Simplicity of Sensory Metrics[ J] . Am Psychol, 1962. 27: 29-39.

[ 5 ] 郑中义. 船舶自动避碰决策系统的研究[ D] . 大连: 大连海事大学, 2000.

New model of collision risk between vessels

ZHENG Zhong-yi, WU Zhao-lin

(Navigation College, Dalian Maritime Univ., Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to establish automatic decision-making system of vessel collision avoidance, the essence of vessel collision risk is analyzed, the concept of space collision risk (SCR) and time collision risk (TCR) are explained, based on summary and analysis on the relative researches done before. On the basis of stimulating-action theory, the concepts of vessel's domain and the last opportunity to use helm, the models of SCR, TCR and collision risk (CR) are established. The results of this paper develop and improve the concept and model of vessel collision risk, which have more logic and applicable value.

**Key words:** vessel; space collision; time; risk; mathematical model